

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.037

光声振耦合对蝗虫趋光响应的激发效应*

刘启航¹ 周 强²

(1. 河北工程大学机电工程学院, 邯郸 056038; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 依据蝗虫对光声振的响应特性,利用自行设计的光声振叠加效应激发蝗虫趋光响应的行为反应试验装置,进行了光声振耦合激发蝗虫趋光响应的试验。结果显示:光声振耦合对蝗虫趋光效应的激发起到增益增效作用,其对蝗虫的推拉驱动性激发效应,能够有效实现蝗虫的趋光诱导效应,其中组合光谱光照强度决定了蝗虫的趋光聚集效应,且光照度增加10倍,光声振激发蝗虫趋光聚集的效果提高25%;在一定范围内,光声振有效激发了蝗虫趋光定向响应,调控光照主导了蝗虫的趋光响应,振动决定了蝗虫趋光的驱动激发效果,而声频起增效增益性激发作用;光声振信号刺激蝗虫多重感受器,产生了有利蝗虫趋光聚集的叠加效应,声频模式、光谱光照调控模式与循环振动模式的合理组合,可有效提高蝗虫趋光效果。

关键词: 蝗虫 光声振耦合 趋光响应 激发效应

中图分类号: S433.2; S499 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0197-06

Inspiring Effect of Locust's Phototactic Response Stimulated by Light-sound-vibration Coupling

Liu Qihang¹ Zhou Qiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

According to locust's response characteristic stimulated by light, sound and vibration, the experiment of locust's phototactic response stimulated by light-sound-vibration coupling effect was carried out by using the designed experimental equipment. The results showed that light-sound-vibration coupling stimulated locust's phototactic effect. The stimulation effect of its pull-push and drive could realize locust's phototactic induction effectively. The illumination of combined spectrum decided locust's phototactic aggregation. The illumination increased by 10 times, the effect of locust's phototactic aggregation stimulated by light-sound-vibration coupling increased by 25%. Within a certain range, light-sound-vibration stimulated locust's phototactic direction response effectively. The regulative spectrum illumination led to locust's phototactic response. Vibration decided the driving stimulation of locust's phototactic response. The audio frequency played the important role in gain motivation. Light-sound-vibration signal stimulated locust's multiple receptors and generated the superimposition effect contributing to locust's phototactic aggregation, so locust's phototactic induction effect could be enhanced effectively through combining different audio frequency mode, regulatory mode of spectral illumination and circulating vibration mode.

Key words Locusts, Light-sound-vibration coupling, Phototactic response, Inspiring effect

引言

灾害蝗虫光电诱导捕集治理不仅可避免喷

施化学农药治理导致的环境污染,还可实现蝗虫用作禽畜饲料等资源利用^[1]。针对蝗虫的趋光特性和蝗虫对不同刺激源的趋避特性,探讨蝗

收稿日期: 2011-12-19 修回日期: 2012-03-11

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060019012)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYCX2011069)

作者简介: 刘启航,讲师,博士,主要从事光机电一体化技术研究,E-mail: bjliuqihang@163.com

虫趋光聚集增益增效的激发因子,对蝗灾的物理捕集生态化治理的实现具有重要意义。研究表明,蝗虫夜间活动力减弱的生物活动习性、蝗虫趋利避害的生存特性制约了蝗虫敏感光谱调控光照特性光诱蝗虫的效果^[2]。同时,蝗虫生存选择性的多种感受器探测外界环境变化的敏感性,导致蝗虫易受到激发和增强蝗虫夜间的活动力,而多种感受器的反应谱范围,易激发蝗虫对引发其共鸣的刺激源的探测敏锐性^[3]。因此,在声、振、热源温度和光耦合激发蝗虫趋光响应的基础上^[4-5],增强蝗虫趋光活性驱动因子和物理刺激源激发蝗虫趋光行为的叠加效应是提高蝗虫诱集率的关键。

本文以蝗虫敏感光谱调控光照激发蝗虫趋光响应的理论为基础,以蝗虫探测最敏感的声源参数和振动参数为条件,研制了蝗虫敏感光谱调控光照条纹诱导灯源,进行光声振叠加效应对蝗虫趋光响应的驱动增益试验,以确定光声振叠加效应对蝗虫趋光响应的激发驱动效果,并探讨光声振叠加效应激

发驱动蝗虫趋光响应的驱动机理。

1 材料和方法

试验虫种为北京市延庆县人工饲养的东亚飞蝗健壮成虫。蝗虫搁置在阳台上的透明玻璃饲养箱内进行自然光适应,试验时采集,试验于 20:00 后在实验室内进行,室内温度为 27~30℃。

1.1 诱导器材

诱导光源^[6]:紫光阵列与绿紫蓝条纹光组合的调控性光照系统,其中紫光光照为 11×9 的大功率 LED(1 W/颗)阵列,尺寸 288 mm×266 mm,绿紫蓝光照为 4 个 1×9 的大功率 LED(1 W/颗)阵列,尺寸 24 mm×266 mm,凸出紫光光照 80 mm,相隔间距 88 mm;调控模式:紫光光照度为 1 000(100) lx,发光间隔为 30 ms 的频闪光照,27 V 直流电源供电,绿紫蓝光照度为 1 000(100) lx,发光周期为 640 ms 的交变光照,12 V 直流电源供电,二者由单片机微控制器通过 KeilC51 编程实现控制功能,TIP-122 进行 LED 阵列驱动(图 1a)。

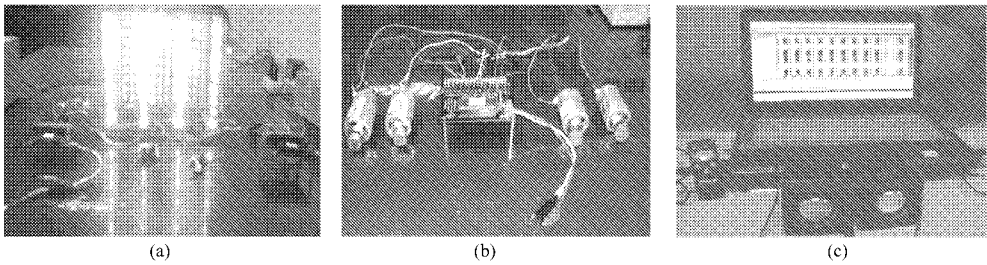


图 1 试验用蝗虫趋光激发诱导器材

Fig. 1 Experimental equipment of locust's phototactic inducement and stimulation

(a) 诱导光源 (b) 振动激发源 (c) 声控激发源

振动激发源:4 个振动频率为 50 Hz、总激振力为 4.26 kN 的直流振动电动机固定在木板(长×宽×高:50 cm×50 cm×5 cm)上作为振动源^[7],12 V 直流电源供电;控制模式:振动时间为 400 ms,振动间歇停止时间为 1 s,89C51 微控制器通过 KeilC51 编程实现控制功能,TIP-122 进行驱动(图 1b)。

声控激发源:计算机控制音频调理电路由音箱播放音频信号,音频信号为蝗虫求偶声、蝗虫报警声、鞭炮声以及频振声^[8-9],蝗虫求偶声、蝗虫报警声、鞭炮声由 Adobe Audition 软件处理为蝗虫敏感的声强和声频。其中蝗虫求偶声作为诱导声,声强为 35 dB,蝗虫报警声激发蝗虫趋光响应的声强和声频分别为 45 dB 和 18 kHz,鞭炮声激发蝗虫趋光响应的声强和声频分别为 45 dB 和 15 kHz,而频振声既作为激发蝗虫趋光响应的刺激源又作为减弱光激发蝗虫拍翅兴奋的抑制源,声强为 45 dB,频率和频振持续时间分别为 50 Hz 和 500 ms,并由

LabWindows 编程经计算机控制音频调理电路由音箱播放实现(图 1c)。

1.2 试验装置

自行设计了光声振叠加效应激发蝗虫趋光响应的行为反应试验装置(图 2)。

图 2 中,蝗虫行为反应通道的尺寸(长×宽×高)为 5 m×0.6 m×0.6 m,并从左端至右端依次划分为 5 个区域,以对比刺激源激发蝗虫趋光响应的差异,4 个直流振动电动机固定在 0.5 m×0.5 m×0.01 m(长×宽×高)木板上的四角,放置于蝗虫活动室(长×宽×高:0.5 m×0.5 m×0.8 m)底端(木板固定在地面上,防止电动机振动时移动,电动机以 4 个长×宽×高为 0.08 m×0.06 m×0.06 m 的盒子密封,以防蝗虫活动影响电动机的工作);利用反应试验装置中的 1、2、5 进行蝗虫音诱和频振抑制蝗虫拍翅兴奋的蝗虫求偶声和频振声的音频控制播放;利用 3、4 实现调控性光照特性;通道闸门 7 起开闭

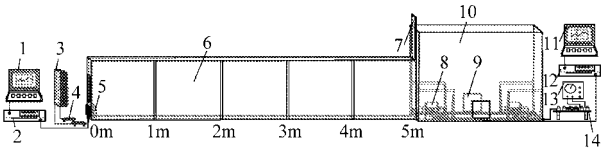


图 2 光声振叠加效应激发蝗虫趋光响应的行为反应试验装置

Fig.2 Experimental equipment of locust's phototactic behavior stimulated by light-sound-vibration superposed effects

1. 声频音诱和频振激发控制设备 2. 声功率放大电路 3. 调控性光源 4. 灯源控制系统 5. 音箱 6. 蝗虫行为反应通道 7. 通道闸门 8. 直流振动电动机 9. 蝗虫趋光激发音箱 10. 蝗虫活动室 11. 蝗虫趋光音频激发控制设备 12. 音频调理电路 13. 12 V 直流电源 14. 直流电动机控制系统

功能;利用 8、13、14 实现振动调控性激发;9、11、12 的功能为实现音频激发蝗虫趋光响应的音频播放模式。装置上方敞空,以利观察。

1.3 试验方法

各组试验均在 20:00 ~ 22:00 进行。考虑到蝗虫对刺激敏感程度的差异及反映蝗虫的群体行为,每次试验虫数为 20 只,重复 2 次,取其平均值,其标准误差为 ±2.5%。光照 5 min,处理间隔 20 min。

首先,标定光源光照度为 1 000 lx,开启反应试验装置中的 1、2、3、4、5、7、8、13、14,进行音诱、调控性光照、振动三者的耦合效应驱动激发蝗虫趋光响应的试验,在此基础上,关闭蝗虫求偶声,开启频振声,进行频声、调控光照、振动三者的耦合效应驱动激发蝗虫趋光响应的试验,然后,关闭 1、2、5,开启 9、11、12,进行音频、调控光照、振动三者的耦合效应驱动激发蝗虫趋光响应的试验;其次,标定光源光照度为 100 lx,根据上述试验步骤,依次进行上述试验,以对比诱导光源光照度为 1 000 lx 和 100 lx 条件下,音频、振动和光照三者耦合驱动激发蝗虫趋光效果的差异。试验后,统计通道划分区域内虫数。

1.4 试验数据处理

以蝗虫趋光响应(反应)率($R_1, \%$)反映光源光照度为 1 000 lx 和 100 lx 条件下,音频、振动和光照三者的耦合效应驱动激发蝗虫趋光响应的大小;以蝗虫在通道划分区域内的分布率($R_2, \%$)反映不同刺激组合驱动激发蝗虫趋光响应的差异,相应公式为

$$R_1 = \frac{m_1}{n} \times 100 \%$$

$$R_2 = \frac{m_2}{n} \times 100 \%$$

式中 m_1 ——不同刺激组合驱动激发蝗虫趋光响应下在通道内的蝗虫数

m_2 ——不同刺激组合驱动激发蝗虫趋光响应下在通道各划分区域内的蝗虫数

n ——蝗虫总数

2 结果与讨论

2.1 试验结果分析

2.1.1 光声振不同组合驱动激发蝗虫趋光响应的效果

不同声刺激与光振组合驱动激发蝗虫趋光响应的结果如图 3 所示(振动频率 50 Hz,振动 400 ms 间歇停止 1 000 ms)。

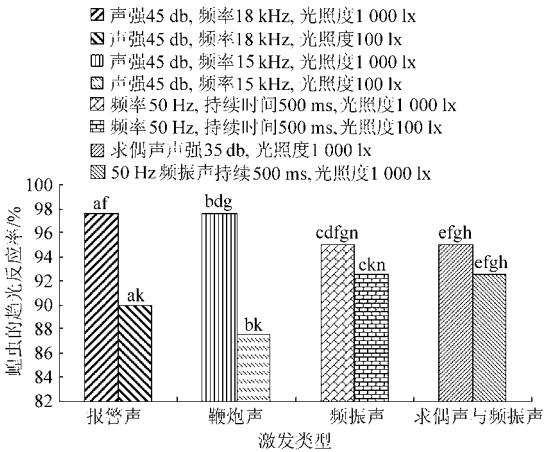


图 3 光声振不同模式组合激发驱动蝗虫的趋光响应

Fig.3 Locust's phototactic response stimulated and drove by different complex patterns of light-sound-vibration

对图 3 试验结果进行 F 显著性检验,表明:声源相同时,声振激发蝗虫对 1 000 lx 和 100 lx 调控性光照的趋光效果差异显著性不同(0.05 水平上,1 000 lx 和 100 lx 之间,图中, a 表示报警声与振动耦合下十分显著, b 表示鞭炮声与振动耦合下极度显著, c 表示频振声与振动耦合下显著);声源不同时,声振耦合激发下,蝗虫对相同光照的趋光存在差异(0.05 水平上,1 000 lx 时,图中 d、e 表示鞭炮声与报警声之间、频振声与求偶声之间差异不显著;0.025 水平上,1 000 lx 时,图中 g、f、h 表示鞭炮声与频振声、鞭炮声与求偶声、报警声与频振声、报警声与求偶声、频振声抑制源与求偶声之间差异十分显著;0.05 水平上,100 lx 时, k 表示不同声源与振动耦合之间差异十分显著);频振声抑制源与振动耦合和频振声激发源与振动耦合分别与振动耦合激发下,蝗虫对 1 000 lx 和 100 lx 的趋光差异性不显著(图中 n 表示 0.025 水平上,1 000 lx 和 100 lx 之间,频振声抑制源和频振声激发源与振动耦合下不显著)。

不同声源与振动耦合激发下,对蝗虫趋光效果的作用不同,其中,光照特性决定了蝗虫的趋光效应,声刺激源对光振耦合效应下蝗虫的趋光响应起

了增益作用,而振动激发增加了蝗虫的趋光选择反应。

根据试验过程中的观察,活动室内蝗虫对光源不同光照度(1 000 lx 和 100 lx)的初始响应敏感性不同,在报警声、鞭炮声、频振声与振动耦合激发蝗虫惊吓逃避行为基础上,易化了蝗虫对较弱性光照的敏感响应,增强了蝗虫对较强性光照的响应程度,并强化了蝗虫的趋光效应,且光源处蝗虫求偶声增

大了蝗虫的趋光强度,光源处频振声抑制了渐强性光照激发下蝗虫的行为剧烈性,稳定了其趋光行为。

因此,光声振耦合可能是增强了蝗虫的行为反应敏感性,并对蝗虫的趋光效应起到了推拉驱动激发性增益增效作用。

2.1.2 光声振耦合激发蝗虫趋光响应的分布

统计计算光声振耦合驱动激发蝗虫趋光响应的分布结果如表 1 所示。

表 1 振动频率 50 Hz,振动持续 400 ms,振动间歇停止 1 s 和不同音频刺激条件下,蝗虫对频闪光间隔 30 ms 紫光 + 交变发光周期 640 ms 绿紫蓝竖直条纹光的趋光分布

音频刺激模式		光照强度 /lx	0 ~ 5 m 总反应率/%	蝗虫在通道各区域内的分布率/%				
声源	声源参数			0 ~ 1 m	1 ~ 2 m	2 ~ 3 m	3 ~ 4 m	4 ~ 5 m
蝗虫报警声	声强:45 db;频率:18 kHz	1 000	97.5	82.5	12.5	2.50	0.00	0.00
		100	95.0	55.0	32.5	7.50	0.00	0.00
鞭炮声	声强:45 db;频率:15 kHz	1 000	97.5	80.0	12.5	5.00	0.00	0.00
		100	92.5	52.5	32.5	7.50	0.00	0.00
频振声 1 *	持续时间:500 ms;频率 50 Hz	1 000	97.5	77.5	12.5	7.50	0.00	0.00
		100	92.5	57.5	27.5	7.50	0.00	0.00
蝗虫求偶声	声强:35 db	1 000	95.0	80.0	12.5	2.50	0.00	0.00
频振声 2 **	持续时间:500 ms;频率 50 Hz	1 000	92.5	75.0	12.5	5.00	0.00	0.00

注: * 9、11、12 声控设备控制的频振声激发蝗虫趋光响应分布; * * 1、2、5 声控设备控制的频振声激发蝗虫趋光响应分布。

由表 1 可知:响应的蝗虫倾向聚集光源 0 ~ 1 m 处,3 ~ 5 m 处无分布,小部分滞留活动室。0.05 水平上, F 显著性检验表明:光照度相同时,不同声源与光振耦合(频振声 2 除外),0 ~ 1 m、1 ~ 2 m 内各自分布差异性不显著,而频振声 2 与光振耦合和其他声源与光振耦合相比,差异性显著;光照度不同时,相同声源与光振耦合,0 ~ 1 m 内、1 ~ 2 m 内,分布差异性极度显著;光照度相同和不同时,光声振耦合,2 ~ 3 m 内分布差异性不大,且总响应差异性不显著,但 0 ~ 1 m、1 ~ 2 m、2 ~ 3 m 内各自分布差异性极度显著。

因此,光声振耦合对蝗虫趋光的激发效应大体相当,且声振耦合刺激有效驱动了蝗虫趋光响应,激发了蝗虫趋光程度,强化了蝗虫的趋光效应,提高了蝗虫趋光诱导效应(0 ~ 1 m 内分布均达到了 90% 左右),则光声振耦合刺激对蝗虫的趋光响应形成了推拉驱动激发性增益增效效应。

试验中,通道 3 m 处至活动室内,蝗虫主要表现为逃离性的惊吓行为,光照与求偶声耦合诱使蝗虫迅速趋向光照侧,通道 3 m 处至光源区域内,蝗虫对调控性光照表现为直接的趋向,求偶声强化了蝗虫趋光行为,光源处频振声抑制了蝗虫的拍翅行为,削

弱了蝗虫趋光惰性,且蝗虫间的相互碰撞加速了蝗虫的趋光响应。

由此可见,光声振信号的不同属性及对蝗虫交叉叠加性激发效应,增强了蝗虫趋光敏感性和蝗虫探测环境的敏锐性,且一定范围内光振对蝗虫的趋光激发起主导作用,声刺激只起强化蝗虫趋光激发的增益增效作用,并在 0 ~ 3 m 光谱光照的调控诱集作用突显,2 ~ 3 m 成为光声振推拉激发蝗虫趋光的分界点。而且光照强度从 100 lx 提高到 1 000 lx,光声振耦合激发下,蝗虫趋光诱集率增加了 25% 左右。因此,依据蝗虫趋光视觉光照阈值和光振调控激发参数,如果能提高振动强度,将能够有效实现蝗虫趋光诱导的聚集效应。

2.1.3 不同激发效应下蝗虫的趋光分布

不同激发效应下蝗虫趋光响应的分布结果如表 2 所示。

对表 2 进行对比可知,调控光照与声振耦合激发蝗虫总响应的效果与单一调控光照大致相当,恒定紫光分别与声、振耦合的激发效果也大致相当,且前二者优于后二者;而恒定紫光最低,并且光声振不同组合方式激发下,蝗虫分布率存在很大差异。其

中,0 ~ 1 m 内,调控光照与声振耦合激发下分布率最高,单一恒定紫光最低(22.5%),但恒定紫光与声或振耦合均高于单一紫光,低于单一调控光照,而1 ~ 3 m 内,恒定紫光与声或振耦合激发下,分布率大致相当(30% 左右),且与单一调控光照相当,但低于恒定紫光。

表 2 不同光声振组合模式激发蝗虫趋光响应的分布

光、声、振刺激组合方式			光照强度 /lx	蝗虫在通道各区域内的分布率/%				
光照模式	声源	振动		0 ~ 1 m	1 ~ 2 m	2 ~ 3 m	3 ~ 4 m	4 ~ 5 m
调控光照	蝗虫报警声	有	1 000	82.5	12.5	2.50	0.00	0.00
恒定紫光	蝗虫报警声	无		47.5	20.0	12.5	2.50	0.00
调控光照	鞭炮声	有	1 000	80.0	12.5	5.00	0.00	0.00
恒定紫光	鞭炮声	无		45.0	25.0	10.0	5.00	0.00
调控光照	频振声 1	有	1 000	77.5	12.5	7.50	0.00	0.00
恒定紫光	频振声 1	无		45.0	20.0	12.5	10.0	0.00
调控光照	蝗虫求偶声	有	1 000	80.0	12.5	2.50	0.00	0.00
恒定紫光	蝗虫求偶声	无		52.5	17.5	10.0	2.50	0.00
调控光照	频振声 2	有	1 000	75.0	12.5	5.00	0.00	0.00
恒定紫光	频振声 2	无		32.5	12.5	20.0	10.0	2.50
恒定紫光	无	有	1 000	40.0	15.0	30.0	2.50	0.00
调控光照	无	无	1 000	57.5	27.5	5.00	0.00	0.00
恒定紫光	无	无	1 000	22.5	30.0	15.0	5.00	0.00

因此,激发敏感点以上的光声振耦合激发蝗虫的趋光响应高于光声、光振,并增强了对蝗虫的刺激强度,且对蝗虫形成的是趋光增益增效性激发效应,其耦合性多重刺激效果产生了有利于蝗虫趋光的叠

加效应,而光照特性对蝗虫的趋光起主导作用,则以调控光照为主导,光声振合理激发,能够有效激发蝗虫快速的趋光响应敏感性,增强蝗虫趋光响应程度,稳定和提高蝗虫趋光效果(图 4)。

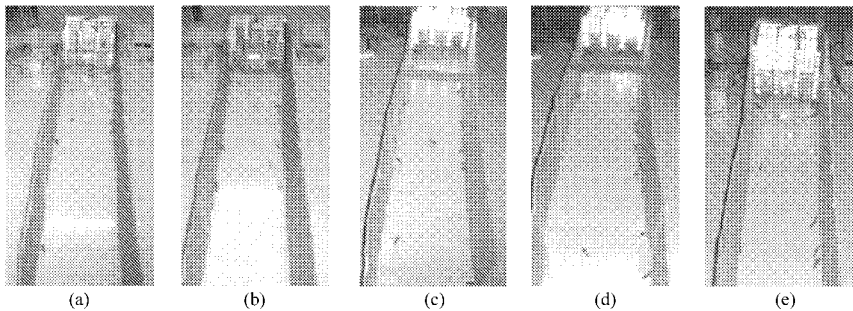


图 4 光振与不同声刺激位置激发驱动蝗虫的趋光响应效果图

Fig. 4 Locust's phototactic response stimulated by combined pattern of light, vibration and different acoustic frequency
(a) 蝗虫报警声(活动室) (b) 鞭炮声(活动室) (c) 频振声(光源处) (d) 频振声(活动室) (e) 蝗虫求偶声(光源处)

2.2 讨论

为了探讨光声振信号对蝗虫趋光的激发效应机理,将光声振耦合激发蝗虫趋光响应的效应简化为图 5。

依据图 5,借助图 3、表 1、表 2 的试验结果及试验现象,进行分析可知,光声振耦合效应场中,光、声、振能量共同作用于蝗虫,形成了协同激发效果,同时激活了蝗虫的多种感受器,引起了蝗虫神经反应强度的叠加性综合,激发了蝗虫对刺激环境行为选择反应的敏感性,并且,光声振刺激激发蝗虫不同感受器引起的响应特性不同,导致了蝗虫对不同刺激模态的趋避敏感性,并对蝗虫的趋光效应产生了

推拉驱动性增益增效作用。
但由于光照特性主导了蝗虫的趋光诱集,且光

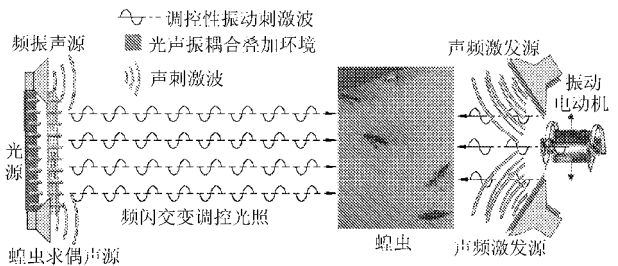


图 5 光声振耦合激发蝗虫趋光响应效应示意图
Fig. 5 Locust's phototactic response stimulated by light, vibration and sound coupling

激发了蝗虫直接趋向光源的行为响应,而声振信号仅激发了蝗虫的趋光响应活性和趋光反应快速性,因此,光声振耦合刺激干扰了蝗虫的活动场所,激发了蝗虫对有利刺激源的直接定向和趋向,则光声振耦合环境下,光对于蝗虫趋光机理的作用,在于光照干扰蝗虫趋光视觉调节下,光量子激发蝗虫趋光兴奋性视觉生物光电效应的强度,影响蝗虫趋光定向和趋光响应的程度,而光、声、振对于蝗虫趋光激发效应机理,取决于蝗虫对刺激信号的匹配敏感性、调谐选择性和刺激强度^[1,6,10~11]。

同时,光、声、振以能量波的形式,刺激蝗虫的多重感受器,感受器将刺激能量转化成神经电位,神经电位决定了神经反应能否被激发及被激发的程度^[12],并最终与蝗虫行为反应强度及其敏感性的易化程度等形式体现出来,蝗虫行为反应的程度反映了能量激发蝗虫神经电生理活动的程度,并由蝗虫敏感刺激能量的强度决定;蝗虫敏感响应点以上的光声振能量刺激蝗虫,将会出现蝗虫趋光性生理特征。

光声振耦合未能完全激发蝗虫趋光响应、趋光过程中有中途停滞和趋光渐慢的现象,表明蝗虫个体间对敏感响应点以上刺激的行为响应存在差异,但声振激发蝗虫趋光相对于恒定紫外光的增效效果均达到了15%以上,表明光声振耦合对蝗虫趋光效应

起到了增效增益的积极作用,因此以光为主导,在查找蝗虫趋光更有效激发措施的基础上,激发模式的合理组合(图5),可避免蝗虫趋光惰性,有效实现蝗虫趋光诱集。

3 结束语

在光声振叠加效应激发蝗虫趋光响应及趋光分布的试验基础上,通过试验数据的对比分析及光声振耦合效应的研究分析表明:光声振耦合效应对蝗虫的趋光效应起到了推拉驱动激发性增益增效作用,而且光照特性(光谱组合、光照强度)主导了蝗虫的趋光聚集效应,光照强度从100 lx提高到1 000 lx,光声振耦合激发下,蝗虫趋光诱集率增加了25%左右,光照参数组合(发光频率33 Hz与发光周期640 ms)的调控性削弱了蝗虫的趋光惰性,且一定范围内调控光照、调控振动(振动频率50 Hz,振动持续400 ms,振动间歇1 s)对蝗虫的趋光激发起主导作用,声刺激只起强化蝗虫趋光激发的增益增效作用。在试验中,通道0~3 m内光谱光照的调控诱集作用突显,2~3 m内成为光声振推拉激发蝗虫趋光的分界点。研究结果明确了光声振耦合效应干扰下有效强化蝗虫趋光反应的激发效应,验证了光干扰激发下蝗虫趋光定向的趋光性学说。

参 考 文 献

- 刘启航,周强. 诱导光源光照梯度对蝗虫趋光效应的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(10):118~123.
Liu Qihang, Zhou Qiang. Influence of trapping light source's illuminance gradient on locusts' phototactic effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):118~123. (in Chinese)
- Jander Barry. The phototactic push-pull-coupling between dorsal ocelli and compound eyes in the phototropotaxis of locusts and crickets[J]. Zeitschrift für Vergleichende Physiologie, 1968, 57(4): 432~458.
- Simmons P J, Rind F C. Responses to object approach by a wide field visual neurone, the LGMD2 of the locust: characterization and image cues[J]. Journal of Comparative Physiology A, 1997, 180(3): 203~214.
- Thomas F. The vibrational startle response of the desert locusts[J]. Journal of Experimental Biology, 1999, 202(16): 2151~2159.
- Pece A E C, French A S. Sublinear summation of responses in locust photoreceptors[J]. Journal of Comparative Physiology A, 1992, 170(6): 729~738.
- 刘启航,周强. 频闪脉冲光源与交变光源对蝗虫趋光响应的试验研究[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2011, 32(3): 260~265.
- Bayramoglu-Ergene. S. The accelerating effect of mechanical vibrations on the positive phototaxis of *Locusta migratoria*[J]. Zeitschrift für Vergleichende Physiologie, 1969, 64(3): 351~354.
- Dawson J W, Kutsch W, Robertson R M. Auditory-evoked evasive manoeuvres in free-flying locusts and moths[J]. Journal of Comparative Physiology A, 2004, 190(1): 69~84.
- Schmeling F, Stange G, Homberg U. Synchronization of wing beat cycle of the desert locust, *Schistocerca gregaria*, by periodic light flashes[J]. Journal of Comparative Physiology A, 2010, 196(3): 199~211.
- Thomas A M, Rava A S, Sandra S, et al. Approach sensitivity in the retina processed by a multifunctional neural circuit[J]. Nature Neuroscience, 2009, 12(10): 1 308~1 316.
- 王荫长. 昆虫生理学[M]. 北京:中国农业出版社,1991: 450~451.
- Nicholls J G, Martin A R, Wallace B G, et al. 神经生物学:从神经元到脑[M]. 杨雄里,译. 北京:科学出版社,2003:202~444.